

Andrzej CHUDZIKIEWICZ
Jerzy PIOTROWSKI
Zygmunt NOWAKOWSKI

MODELOWANIE I ANALIZA ZUŻYCIA PROFILI KÓŁ LOKOMOTYW PRZEMYSŁOWYCH

Streszczenie. Celem artykułu jest przedstawienie problematyki modelowania i analizy zużycia profili kół lokomotyw pracujących w transporcie wewnętrznym w takich zakładach, jak huty czy kopalnie. Jak pokazały badania eksploatacyjne, następuje w tych warunkach szybkie zużywanie się profili kół lokomotyw, co pociąga za sobą dodatkowe, duże koszty. Podjęte prace analityczne miały na celu ocenę przydatności w tych warunkach kilku wybranych profili kół.

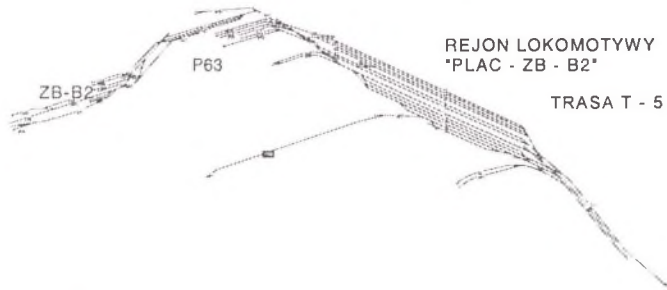
MODELLING AND ANALYSIS OF WHEEL PROFILES WEAR OF THE INDUSTRIAL LOKOMOTIVES

Summary. Large plants of heavy industry such as steel mills, extensively use railway trains to bring supplies of good. The wheels of lokomotives work in very hard conditions due to the track topography and polutions. The goal of the paper is to shown the results of a comparision study a few profiles taking into account the less wear inclinations.

1. WSTĘP

W zakładach przemysłu ciężkiego, jak np. huty, kopalnie, przemysł maszynowy, do przewozów surowców, półproduktów czy gotowych wyrobów wewnątrz zakładu wykorzystuje się transport szynowy. Sieć kolejowa w takich zakładach charakteryzuje się dużą ilością rozjazdów oraz łuków o małych promieniach. Przykładowy wycinek sieci Huty T. Sendzimira pokazano na rys. 1. Jeśli do tego dodać częste przeciążenia wagonów oraz zanieczyszczenie środowiska, to otrzymamy rzeczywisty obraz warunków, w jakich pracują lokomotywy przemysłowe. W Polsce obowiązującym standardem w zakresie sieci kolejowej w zakładach przemysłowych jest ustalony przez PKP układ S49 – 1:20, co przy łukach o promieniu mniejszym niż 80 m oraz uwarunkowaniach konstrukcyjnych lokomotyw spalinowych trójosiowych powoduje szybsze zużywanie się profili kół. Ponadto podstawowym profilem stosowanym w zestawach kolejowych, zgodnie z kartą UIC 510-2, są profile typu 28UIC dostosowane raczej

do warunków transportu odbywającego się ze średnimi prędkościami podróznymi nie mniejszymi niż 80 km/h, gdy tymczasem transport wewnątrzzakładowy odbywa się z prędkościami średnimi mniejszymi niż 30 km/h.



Rys. 1. Przykładowy wycinek sieci Huty im. T.Sendzimira
Fig. 1. An example of railway net in Sendzimir Ironworks

Uwarunkowania te są powodem wzrostu kosztów produkcji, spowodowanego koniecznością częstszych remontów związanych z potrzebą przetoczenia profili kół zestawu, a tym samym powodują spadek jej opłacalności. Podjęto w związku z tym prace [1] mające na celu analizę tego zjawiska oraz modyfikację stosowanego do tej profilu kół w zestawach lokomotyw pracujących w warunkach transportu wewnątrzzakładowego.

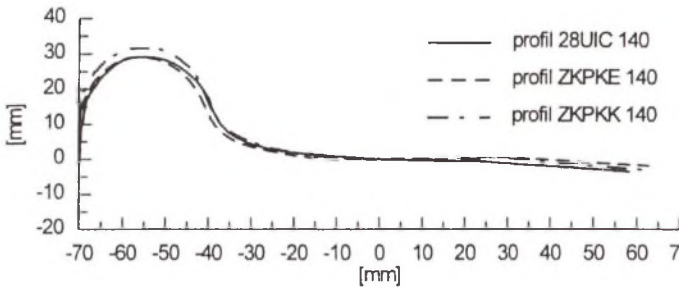
2. CEL BADAŃ ORAZ ZAŁOŻENIA METODY

Podejmując prace nad realizacją założonych w projekcie KBN celów, opracowano szczegółowy program badań:

- eksperymentalnych, mających na celu zebranie informacji o rzeczywistym kształcie profili zmieniających się w trakcie eksploatacji,
- teoretycznych, które wykorzystując metody symulacji komputerowej mogłyby przybliżyć i zrozumieć mechanizm wpływu różnych czynników na zużycie oraz zastąpić w przyszłości kosztowne i długotrwałe badania eksperymentalne.

Ponadto pomiary eksperymentalne miały na celu uzupełnienie profilami bazy danych, aby w przyszłości można było wykorzystać zgromadzone informacje również w innych pracach analitycznych. Założenia tego eksperymentu oraz jego organizacja zostały przedstawione w [2,3], natomiast w tej pracy zajmujemy się badaniami symulacyjnymi. Należy jednak wspomnieć, że zarówno badania eksperymentalne, jak i symulacje komputerowe były wykonywane dla tych samych typów profili. Były to profile: 28UIC 140, ZKPKE 140 i ZKPKK 140 przedstawione na rys. 2.

Zgodnie z hipotezą zużycia ściernego założono, że ubytek materiału (obręczy koła, powierzchni szyny) jest proporcjonalny do jednostkowej pracy tarcia rozpraszanej w danym punkcie zarysu tocznego [4]. Tory kolejowe w zakładzie przemysłowym charakteryzują się dużą ilością łuków, a jazdy odbywają się z niskimi prędkościami. W związku z tym dla wyznaczenia pracy tarcia zastosowano matematyczne modelowanie quasi-statycznego przejazdu lokomotywy przez łuk torowy. Pełna analiza zagadnienia zawierała następujące etapy:



Rys. 2. Profile 28UIC 140, ZKPKE 140 i ZKPKK 140
 Fig.2. Profiles: 28 UIC 140, ZKPKE 140 and ZKPKK 140

- Obliczenie tablicy kontaktowej, która zawiera geometryczne i kontaktowe parametry. Parametry kontaktowe obliczane były, zakładając kontakt niehertzowski, aproksymacyjną metodą zaproponowaną przez Kika i Piotrowskiego [5]. Wyniki obliczeń kontaktowych były w postaci parametrów charakteryzujących równoważne elipsy kontaktowe gromadzone w tablicach. Obliczenia te były wykonywane oddzielnie dla każdego toru o zadanym łuku.
- Rozwiązanie quasi-statycznego zagadnienia równowagi pojazdu wpisanego w zakrzywiony tor o zadanym promieniu łuku. Siły kontaktowe w tym modelu obliczane były nieliniową teorią Kalkera [6].
- Obliczenie, dla każdego koła zestawu kołowego, położenia obszaru kontaktowego, a następnie wartości pracy sił tarcia związanej z tym obszarem.

Trasa pokonywana przez lokomotywę podczas pracy składa się z szeregu łuków lewych i prawych, jazda może się odbywać w kierunku "tam" lub "z powrotem". Możliwe są również takie sytuacje, gdy lokomotywa zostaje obrócona na obrotnicy. Wszystkie te sytuacje nie są uwzględniane w modelu matematycznym oddziaływania lokomotywy na tor zakrzywiony, gdyż prowadziłoby to do znacznych komplikacji i tak już bardzo złożonego modelu. Model uwzględnia tylko jedną orientację łuku, jeden kierunek ruchu i jedną ustaloną orientację lokomotywy na łuku. Dla uwzględnienia wszystkich możliwych przypadków występujących podczas eksploatacji opracowano system współpracujących ze sobą programów komputerowych, które przetwarzają wyniki obliczeń oddziaływania lokomotywy na tor przypisując pracę tarcia do odpowiedniego koła i do odpowiedniego punktu na zarysie koła (gdzie koło styka się z szyną). Poszczególne elementy tego systemu (programy) zostały omówione poniżej.

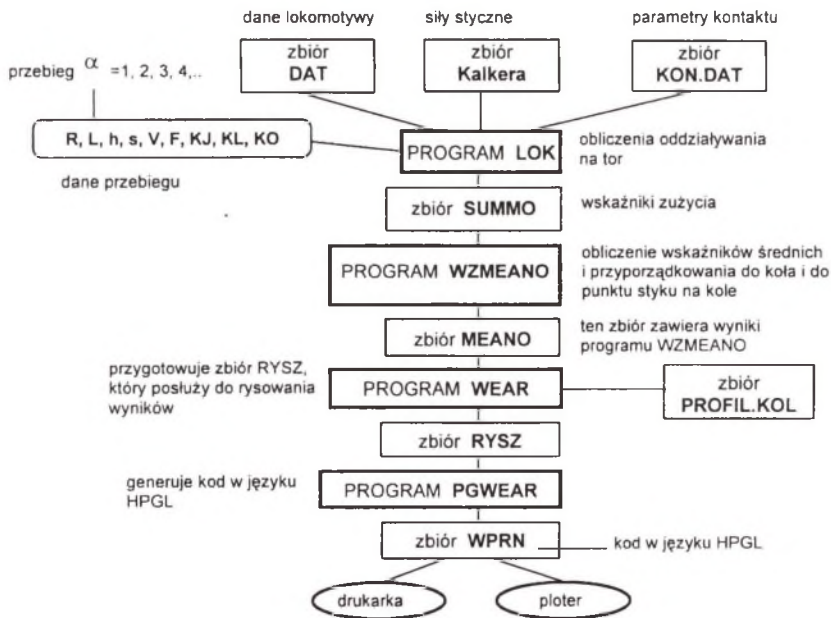
3. SYSTEM PROGRAMÓW DO ANALIZY ZUŻYCIA

System składa się z programu podstawowego o nazwie LOK i trzech programów przetwarzających: WZMEANO, WEAR, PGWEAR. Schemat systemu obliczeń i przetwarzania wyników przedstawiono na rys. 3.

Program LOK jest głównym elementem systemu, gdyż opisuje on kompleksowo oddziaływanie między lokomotywą i torem na łuku. U podstaw programu znajduje się model matematyczny opracowany przez Piotrowskiego (1978, 1981), który w następnych latach został rozwinięty i w obecnej chwili jest jednym z najbardziej zaawansowanych modeli pod względem struktury i opisu kontaktu koła z szyną. Modele z lat 1978-81 dotyczyły dwupunktowego

styku kół prowadzących z szynami i były pierwszymi modelami uwzględniającymi ten specyficzny i ważny rodzaj kontaktu.

Program LOK dotyczy styku jednopunktowego, który występuje dla rozważanych w niniejszym opracowaniu profili. Opis matematyczny jest podobny jak dla styku dwupunktowego. Zamiast sił na obrzeżach kół występujących przy styku dwupunktowym, zostały wprowadzone siły fikcyjne, które w rzeczywistości nie występują. Program LOK, przy wykorzystaniu sformułowania i metod programowania matematycznego, wyznacza takie położenie lokomotywy w torze i towarzyszące mu siły normalne i styczne, że siły fikcyjne osiągają wartości (praktycznie) zerowe. Opis kontaktu zestawów kół i szyn toru ma postać tablicy kontaktowej.



Rys. 3. Schemat systemu obliczeń i przetwarzania wyników

Fig.3. Scheme of calculations and processing of results

Tablica 1

Parametry trasy i warunków ruchu

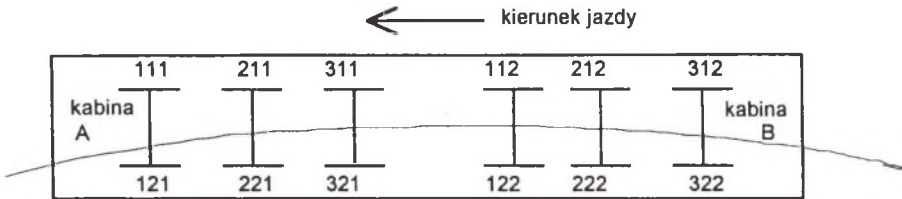
Nr odcinka ###	R [m]	L [m]	Przechyłka h [m]	Poszerzenie toru s [mm]	F siła trakcyjna [kN]	V [km/h]	KJ	KL	KO
1	228	35	0.120	10		20	1	1	1
2	98	28	0.135	25		15	1	2	1
3

gdzie: R - promień łuku, L - długość łuku, h - przechyłka, s - poszerzenie toru, F - siła trakcyjna, V - prędkość jazdy, KJ - indeks kierunku jazdy; dopuszczalne wartości 1,2, KL - indeks kierunku łuku; dopuszczalne wartości 1,2, KO - indeks określający orientację lokomotywy; dopuszczalne wartości 1,2.

Każdy odcinek pokonywanej trasy jest łukiem torowym, którego parametry są określone w tablicy o poniższym układzie. Do tablicy są również wpisywane parametry trakcyjne oraz indeksy opisujące orientację łuku i pojazdu.

Dla sytuacji przedstawionej na rys. 4 $KJ = 1, KL = 1, KO = 1$.

Pszczególne koła są oznaczone indeksami i, j, k , przy czym: i - indeks zestawu kół (1 do 3), j - indeks koła (1 do 2), k - indeks wózka (1 do 2).



Rys. 4. Indeksowanie kół wózków
Fig.4. Indexing of wheels

Tak przygotowane dane dla kilkunastu (kilkudziesięciu) łuków umożliwiają przyporządkowanie pracy sił tarcia na poszczególnych (dwunastu) kołach do odpowiedniego koła i punktu na zarysie obręczy koła (punktu styku), w którym jest wytwarzana praca sił tarcia w czasie jazdy.

Pełne wyniki obliczeń są zapisywane w zbiorze WYNIK w konwencji jak na rys. 4. Dla analizy trendu zużycia obliczana w danym przebiegu przez program jednostkowa praca sił tarcia na poszczególnych kołach W_{jk} ($i=1,3; j=1,2; k=1,2$) (wskaźnik zużycia) jest dopisywana do zbioru SUMMO (appendable file) wraz z geometrycznymi parametrami lokalizującymi punkt styku na profilu obręczy danego koła. Jednocześnie są dopisywane parametry danego przebiegu zaczerpnięte z tabl.1. Po wykonaniu wszystkich przebiegów dla danej trasy zbiór SUMMO jest poddawany przetwarzaniu przez program WZMEANO. Program ten służy do obliczenia względnych wskaźników zużycia (WWZ) i do przyporządkowania obliczonego względnego wskaźnika do odpowiedniego koła, zgodnie z sytuacją opisaną przez parametry trasy KJ, KL, KO . Dane dla programu WZMEANO są zawarte w zbiorze SUMMO.

Względny wskaźnik zużycia dla odcinka trasy $###$ i dla punktu styku na kole o indeksie lmn jest obliczany i przyporządkowywany do właściwego koła według następujących wzorów:

$$WWZ_{lmn}^a = \frac{W_{ijk}^{(a)} L_a}{L_t}, \tag{1}$$

gdzie:

$$k' = \frac{1}{2} [3 - (-1)^{KO} \cdot (2 \cdot KJ - 3)]$$

$$l = k' + (-1)^k (k' - i),$$

$$m = \frac{1}{2} [3 + (-1)^{KL} (-1)^k (2 \cdot j - 3)],$$

$$n = 1 + (-1)^k (k' (k' - k)),$$

$$L_t = \sum_{\alpha=1}^N L_a.$$

Indeksy i, j, k są określone zgodnie z konwencją jak na rys. 4, N jest ilością odcinków trasy, a L , jest całkowitą długością przejechanej trasy. Zbiorem wynikowym programu jest zbiór MEANO.

Uzyskany w poprzednim kroku przetwarzania zbiór MEANO jest wykorzystywany przez program WEAR jako zbiór wejściowy. Drugim zbiorem wejściowym jest PROFIL.KOL, który zawiera współrzędne prostokątne zarysów kół wszystkich zestawów kół wózka. Istota działania programu WEAR polega na tym, że wartość względnego wskaźnika zużycia jest przedstawiana w postaci odcinka o długości proporcjonalnej do wartości WWZ . Odcinek posiada punkt wspólny z zarysem koła (jest to punkt styku) i jest poprowadzony prostopadle (pod kątem styku) do zarysu koła. Zgodnie z hipotezą zużycia ściernego ubytek materiału w punkcie styku (w punkcie zaczepienia odcinka) jest proporcjonalny do długości odcinka.

Ostatni z programów systemu, program PGWEAR, generuje kod wynikowy w języku HPGL, który jest zapisywany w zbiorze WPRN. Zbiorem wejściowym jest RYSZ. Grafika HP ma tę zaletę, że kod wynikowy jest szybki, o małej objętości i można używać do rysowania drukarki lub plotera. Należy zauważyć, że przy budowie systemu nie wykorzystano żadnych własności symetrii, którymi charakteryzują się nominalne zarysy główek szyn i obręczy kół. Dzięki temu system może być stosowany dla realnych, zużytych szyn i kół, które żadnych symetrii nie posiadają. Dla uzyskania danych opisujących zarysy zużyte niezbędne jest przeprowadzenie pomiarów przy użyciu maszyn pomiarowych do toru i zestawów kół lub innych metod pomiarowych.

4. OBLICZENIA SYMULACYJNE

Obliczenia zostały przeprowadzone dla przygotowanej marszruty na trasie reprezentatywnej dla pracy lokomotyw w Hucie Sendzimira. Opis trasy i warunków ruchu w postaci tabelarycznej przygotowano korzystając z tablicy 1 (przykład zamieszczono poniżej).

Tablica 2

Parametry trasy i warunków ruchu

Nr	R	L	s	V	KJ	KL	KO	Nr	R	L	s	V	KJ	KL	KO
	[m]	[m]	[mm]	[km/h]					[m]	[m]	[mm]	[km/h]			
1	136	1771	25	20	1	1	1	37	762	438	0	20	1	1	1
2	136	1771	25	20	1	2	1	38	762	438	0	20	1	2	1
3	136	1771	25	20	1	1	2	39	762	438	0	20	1	1	2
4	136	1771	25	20	1	2	2	40	762	438	0	20	1	2	2
.....															
33	611	478	0	20	1	1	1	69	1839	30	0	20	1	1	1
34	611	478	0	20	1	2	1	70	1839	30	0	20	1	2	1
35	611	478	0	20	1	1	2	71	1839	30	0	20	1	1	2
36	611	478	0	20	1	2	2	72	1839	30	0	20	1	2	2

Obliczenia zostały wykonane dla dwóch wariantów dotyczących przechyłek:

Tablica 3

Warianty dotyczące przechyłki

Wariant	Przechyłka
1	Przechyłka toru na łuku zgodnie ze standardem PKP
2	Brak przechyłki na wszystkich łukach

Założono, że jazda lokomotywy odbywa się bez rozwijania siły pociągowej. Są to najbardziej niekorzystne warunki ze względu na zużycie obrzeży kół. Obliczenia zostały przeprowadzone dla następujących wariantów, gdy chodzi o profile obrzeży kół i szyn:

Tablica 4

Warianty zarysów obrzeży kół

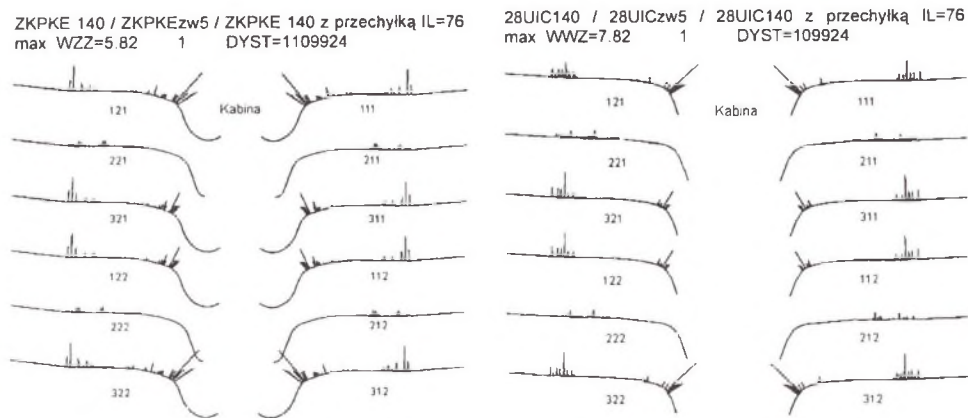
Wariant	Przedni zestaw kół wózka	Środkowy zestaw kół wózka	Tylny zestaw kół wózka	Szyny toru kolejowego
1	ZKPKE140	ZKPKE140 zw 5	ZKPKE140	S49 1:20
2	ZKPKE140	ZKPKE140 zw 10	ZKPKE140	S49 1:20
3	28UIC140	28UIC140 zw 5	28UIC140	S49 1:20

Wyniki obliczeń w postaci liczbowej mają dużą objętość i z tego powodu zostały zapisane na dyskietce. Wyniki obliczeń w postaci graficznej przedstawiono na rysunkach. Rysunki zostały wydrukowane na drukarce, a dla porównania wariantów z przechyłką i bez przechyłki rysunki zostały wykonane przy użyciu plotera.

Zgodnie z parametrami trasy podanymi w tabl.2. dla każdej kombinacji 6 profili obrzeży z szynami toru konieczne było przeprowadzenie obliczeń geometrycznych i kontaktowych dla 5 różnych poszerzeń toru, a więc wygenerowanie 30 tablic kontaktowych.

Zgodnie z wariantami wyszczególnionymi w tabl. 3 i 4 przeprowadzono 6 serii obliczeń oddziaływania lokomotywy na tor. Trasa zawiera 72 odcinki, a więc konieczne było wykonanie 432 przebiegów programu LOK.

Wyniki w postaci liczbowej odnoszące się do zużycia zostały zapisane w zbiorach SUMMO i MEANO. Przykładowe wyniki w postaci graficznej przedstawiono na rysunku 5. Każdy rysunek pokazuje zarysy obrzeży zestawów kół wózka oraz reprezentuje względne wskaźniki zużycia *WWZ*. Rysunki, które byłyby wykonane na ploterze, pokazują zarysy w podziale 1:1.



Rys. 5. Przykładowe graficzne wyniki obliczeń oddziaływania lokomotywy na tor
 Fig.5. An example of calculation results of interaction between locomotive and track

Względny wskaźnik zużycia (*WWZ*) jest reprezentowany przez odcinek prostej normalny do zarysu, wystawiony w punkcie styku. Wartość *WWZ* jest proporcjonalna do długości odcinka, a najdłuższy odcinek odpowiada wartości max *WWZ* podanej w nagłówku rysunku.

WNIOSKI

Z uwagi na ograniczone możliwości powyżej przedstawiono tylko przykładowe dwa rysunki pokazujące symulacyjne wyniki zużycia. Wnioski odnoszą się jednak do całości uzyskanych wyników.

Przeoglądając wyniki graficzne, można zauważyć podobny we wszystkich wariantach wpływ urządzenia skrętowego wózka, doprowadzający do większych wskaźników zużycia obrzeży kół dla pierwszego i ostatniego zestawu niż na pozostałych zestawach prowadzących. Środkowe, nieprowadzące zestawy kół (o podtoczonych obrzeżach), zgodnie z przeznaczeniem współpracują z szynami tylko na fragmentach zarysu w okolicy okręgu tocznego. Podtoczenie (zwężenie) obrzeża o 5 mm jest wystarczające dla uniknięcia kontaktu obrzeża z szyną na każdym odcinku rozpatrywanej trasy.

Obliczenia symulacyjne jazdy lokomotywy z obręczami kół o standardowych zarysach 28UIC140 wykazują skupienie pracy tarcia (wskaźników zużycia *WWZ*) w dwóch strefach: na przejściu między powierzchnią toczną i obrzeżem oraz na powierzchni tocznej w okolicy nominalnego okręgu tocznego. Maksymalna wartość *WWZ* wynosi ok. 80 Nm/m. Prawie całkowity brak styku z szyną między tymi strefami wskazuje, że profil ten nie sprzyja rozłożeniu zużycia na szerszy fragment zarysu.

Zarys obrzeży ZKPKE jest z tego punktu widzenia korzystniejszy. Tu praca tarcia jest rozłożona na większy fragment zarysu, a największa wartość *WWZ* dla łuków ze standardowymi przechyłkami wynosi 58.2 Nm/m. Stanowi to 73% największej wartości *WWZ* przy profilach 28UIC. Ten fakt należy uznać za bardzo korzystny, gdyż profil ZKPKE nie tylko będzie lepiej wykorzystywał materiał obrzeży, lecz również poprawi oddziaływanie lokomotywy na tor zakrzywiony, co wyrazi się mniejszymi wskaźnikami zużycia.

Zarys obrzeży ZKPKK charakteryzuje się korzystnym rozłożeniem pracy tarcia na profilu obrzeża. Wydaje się, że ten rozkład jest nawet korzystniejszy niż dla profili ZKPKE. Największa wartość *WWZ* wynosi 66.5 Nm/m, co stanowi 83% największej wartości dla zarysów 28UIC. A więc również ten profil polepsza oddziaływanie lokomotywy na tor zakrzywiony.

Wyniki symulacji przejazdów trasy przy założeniu braku przechyłek na łukach wskazują, że brak przechyłek prowadzi do wyraźnego wzrostu wskaźników zużycia. Jest to szczególnie widoczne dla zarysów ZKPKE i ZKPKK. Dla ZKPKE max *WWZ* wzrasta o 37% przy braku przechyłek. W przypadku ZKPKK max *WWZ* zwiększa się o 30%.

Acknowledgment

The author wishes to acknowledge the financial support provided by the State Committee for Scientific Research (Grants KBN: no. 9 T12C 029 11 and no. 9 T12C 005 14).

LITERATURA

1. Modernizacja lokomotyw typu S200 eksploatowanych na wewnątrz zakładowej sieci kolejowej Huty im. T. Sendzimira, w zakresie minimalizacji zużycia obrzeży kół napędowych. Projekt Celowy KBN, nr 9T12C 03296C/3013, 1997-97.
2. Chudzikiewicz A., Nowakowski Z.: Minimalizacja zużycia zarysów czynnych obrzeży kół lokomotyw pracujących w warunkach kolejowego transportu przemysłowego. Konferencja Naukowo-Techniczna „Postęp i Przemiany w KPK – 1997”, Tarnowskie Góry-Kokotek 1997.

3. Chudzikiewicz A., Nowakowski Z.: Metoda diagnozowania stanu profili obręczy kół lokomotyw przemysłowych. Referat przyjęty na IV Krajową Konferencję „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów”, DIAG'98, Międzyzdroje 18.04.1998.
4. Chudzikiewicz A., Kalker J.J.: Calculation of the evolution of a railway wheel profile trough wear. International Series of numerical Mathematics, Vol. 101. 1991, Birkha user Verlag Basel, pp. 71-84.
5. Kik W., Piotrowski J.: A fast, approximate method to calculate normal load between wheel and rail and creep forces during rolling. Proc. of 2nd Mini-Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Editor I. Zabory, TU Budapest 1996.
6. Kalker.: Three-dimensional elastic bodies in rolling contact. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London 1990.

Recenzent: Dr hab.inż. Marek Sitarz
Prof. Politechniki Śląskiej

Abstract

Large plants of heavy industry such as steel mills, coke plants and collieries extensively use railway trains to bring supplies of raw material and to transport intermediates and the final product. The track network within plants is built according to PKP's standards with S49 – 1:20 rails but the sharpest curve have radii of curvature as small as 70 m. Usually, most curves of the network have very small radii of curvature. The trains are towed with heavy three-axle-bogie diesel locomotives. The wheels of locomotives are profiled according to PKP's standards. The middle wheelset of the bogie has the same design of the axle-box bearing and guidance as the front and rear wheelsets so, it has to be equipped with the narrowed flange profiles. The wheels of locomotives work in very hard conditions due to track topography, very dusty environment and unfavourable layout and design of bogies. This results in a fast, severe wear of rolling surface, especially flanges. As the traffic within the plants runs with a low speed, profiles of wheels need not have properties built into design of standard PKP profiles, important for the main-line operation. It causes that a study was introduced for analysed the wear profiles problem, which work in those conditions. The three profiles were taking into account and the experimental and computer simulation studies were done. The paper has shown only result of the analytical consideration.